اثر نسبت انحنا و طول گام لوله‌ی مارپیچی بر افت فشار و عملکرد حرارتی جریان آرام نانوسیال تیتان/آب*

مصطفی کاهانی[۱]	سعید زینالی هریس[۲]	سید محمود موسوی[۳]

چکیده *در این مطالعه اثر نسبت انحنا و طول گام لوله‌ی مارپیچی بر رفتار حرارتی و میزان افت فشار جریان آرام نانوسیال تیتان/آب درون لوله‌های مارپیچی افقی به‌صورت تجربی بررسی شده است. نانوسیال تیتان/آب با غلظت‌های حجمی ۰/۲۵٪ تا ۲٪ به روش دو مرحله‌ای تولید شده‌اند. آزمایش‌ها برای لوله‌های مارپیچی با نسبت انحنای ۱۰ و ۲۰ و هم‌چنین طول گام ۲۴ و ۴۲ انجام پذیرفته است. عدد ناسلت با افزایش غلظت حجمی نانوذرات و هم‌چنین عدد رینولدز بهبود می‌یابد. این افزایش به‌دلیل هدایت حرارتی مؤثر بالاتر نانوسیال و هم‌چنین تقویت اختلاط نانوذرات می‌باشد. ضمن این‌که افزایش جرم حجمی و گرانروی نانوسیال در مقایسه با سیال پایه منجر به افزایش افت فشار جریان داخل لوله‌ی مارپیچی می‌گردد. هم‌چنین نرخ انتقال حرارت درون لوله‌های مارپیچی با افزایش طول گام و کاهش نسبت انحنا بهبود می‌یابد. از سوی دیگر، نسبت انحنا در مقایسه با طول گام تأثیر بیش‌تری بر روی عدد ناسلت و افت فشار نشان می‌دهد. ۴۲/۱ درصد بهبود عدد ناسلت برای نانوسیال ۲ درصد حجمی نسبت به سیال پایه به‌دست می‌آید. در پایان تطبیق مناسب و معقول نتایج تجربی عدد ناسلت و افت فشار با مقادیر تخمین زده‌شده برای جریان نانوسیال درون لوله‌های مارپیچی مورد مطالعه قرار گرفته است.*

واژه‌های کلیدی نانوسیال، لوله‌ی مارپیچی، نسبت انحنا، طول گام، انتقال حرارت، افت فشار.

Curvature Ratio and Pitch Spacing Effect of Helical Coiled Tube on Pressure Drop and Heat Transfer Behavior of TiO_2/Water Nanofluid laminar Flow

M. Kahani	S. Zeinali Heris	S.M. Mousavi

Abstract *In the present study the effect of curvature ratio and coil pitch for TiO_2/water nanofluid laminar flow on heat transfer behavior and pressure drop through helical coils with different geometries was investigated experimentally. The TiO_2/water nanofluids at 0.25% to 2% particle volume concentrations have been prepared by using a two-step method. The experiments were performed for coils with curvature ratio of 10 and 20 and coil pitch of 24 and 42. Based on the experimental data, it is found that the Nusselt number as well as Reynolds number improves while increasing particle volume concentration. This enhancement is due to the higher effective thermal conductivity of nanofluid and also intensification of nanoparticles. Besides, increase in density and viscosity of nanofluid compared to the base fluid leads to a pressure drop increment for flow through helical coiled tube. Furthermore, the heat transfer rate improves with the increase of pitch coils and decrease of curvature ratio. Additionally, curvature ratio shows more significant effect on Nusselt number and pressure drop than pitch spacing. 42.1% enhancement on Nusselt number is obtained for the nanofluid with 2% volume concentarion in comparison to the base fluid. Finally, it is shown that the experimental results and predicted results of Nusselt number and pressure drop for nanofluid flow through helical coils hold reasonable agreement.*

Key Words Nanofluid, Helical coiled tube, Curvature ratio, Coil pitch, Heat transfer, Pressure drop

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۹/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۳/۲۰ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده‌ی مسؤول: دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

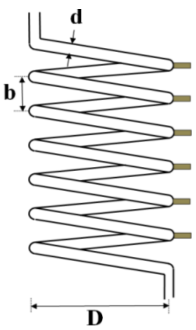
(۳) استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

عملکرد تجهیزات حرارتی با به‌کارگیری تکنیک‌های خاصی بهبود می‌یابد. به‌صورت کلی این تکنیک‌ها را می‌توان به دو دسته تکنیک‌های فعال و تکنیک‌های غیرفعال تقسیم نمود. تکنیک‌های فعال به نیروهای خارجی نظیر میدان الکتریکی و مغناطیسی احتیاج دارند، در حالی که تکنیک‌های غیر فعال شامل اضافه کردن افزودنی‌ها به سیالات و یا تغییر شکل هندسی سیستم حرارتی می‌باشد. استفاده از لوله‌های مارپیچی جزء تکنیک‌های غیرفعال بهبود انتقال حرارت می‌باشند که به‌علت ساختار فشرده و ضریب انتقال حرارت بالا، کاربرد آن‌ها گستره‌ی وسیعی از ساخت فرآیندهای بازیافت گرما، سیستم‌های سرمایشی و تهویه‌ی هوا، هم‌زن‌ها، رآکتورهای هسته‌ای و ... را در بر می‌گیرد. عملاً با پیچه کردن یک لوله می‌توان انتقال گرما را تقویت کرد بدون این‌که تلاطمی به‌وجود آید یا مساحت سطح انتقال گرما افزایش یابد. در این حالت نیروهای گریز از مرکز یک جریان ثانویه را به‌وجود می‌آورند. این جریان از یک جفت گردابه‌ی طولی (Longitudinal Vortex) تشکیل می‌شود که با افزایش اختلاط در سطح مقطع و هم‌چنین کاهش پراکندگی محوری ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش می‌دهند. البته بسته به میزان انحنا، امکان حضور بیش از یک جفت گردابه نیز در جریان ثانویه وجود دارد. هم‌چنین به‌علت نداشتن هیچ جزء متحرکی می‌توان با مصرف انرژی کم‌تر و البته هزینه‌ی نگهداری پایین‌تر انتظار عملکرد به‌تری از تجهیزات حرارتی با استفاده از لوله‌های مارپیچی داشت [1]. مشخصات هندسی یک لوله‌ی مارپیچی که در شکل (۱) نشان داده شده است شامل قطر لوله (d)، قطر حلقه (D)، نسبت انحنا ($\lambda = D/d$) و طول گام (b) یا به‌عبارتی ارتفاع لوله طی یک دور پیچش می‌باشد.

عدد دین ($\mathrm{De} = \mathrm{Re}(\mathrm{d}/\mathrm{D})^{1/2}$) نسبت حاصل‌ضرب نیروهای اینرسی در نیروهای گریز از مرکز است به نیروهای لزج و به‌منظور توصیف شرایط جریان در لوله‌های خمیده مورد استفاده‌ی بسیاری از محققاق قرار گرفته است. عدد دین در لوله‌های خمیده همان نقش عدد رینولدز در لوله‌های معمولی را ایفا می‌کند. هم‌چنین میشرا و همکاران [2] با در نظر گرفتن طول گام در لوله‌های مارپیچی عدد هلیکال را به‌صورت رابطه‌ی (۱) تعریف نمودند.

$$\mathrm{He} = \mathrm{De}\left[1 + \left(\frac{\mathrm{b}}{2\pi\mathrm{D}}\right)^2\right]^{-1/2} \qquad (۱)$$



شکل ۱ پارمترهای هندسی معرف یک لوله‌ی مارپیچی و موقعیت قرارگیری ترموکوپل‌ها بر روی آن

عدد ناسلت جریان آرام سیالات در لوله‌های خمیده چندین برابر بیش‌تر از لوله‌های معمولی می‌باشد [3]. هاترون [4] نخستین محققی بود که یک روش عددی برای جریان کاملاً توسعه‌یافته در لوله‌های خمیده ارائه کرد. بعد از او آستین و سیدر [5] نمایه‌ی سرعت در ناحیه‌ی ورودی جریان به لوله را به‌صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها بیان داشتند که با افزایش عدد دین طول ناحیه در حال توسعه نیز افزایش می‌یابد. مولین و همکاران [6] با انجام یک مطالعه‌ی تجربی و عددی بر روی جریان در لوله‌های خمیده بیان داشتند که جریان ثانویه تأثیر قابل توجهی در اعداد رینولدز کم‌تر از ۲۰ ندارد. چن و ژانگ [7] تأثیرات

ترکیبی چرخش و انحنا را (نیروی گریز از مرکز) بر روی الگوی جریان، افت فشار، توزیع دما و عدد ناسلت لوله‌های مارپیچی مورد بررسی قرار دادند. افزایش افت فشار جریان داخل لوله‌های خمیده در مقایسه با افت فشار لوله‌های معمولی برای اولین بار توسط گریندلی و گیبسون [8] مطرح گردید. پاتانکار و همکاران [9] تأثیرات عدد دین را بر افت فشار و انتقال حرارت در ناحیه‌ی کاملاً توسعه‌یافته درون لوله‌های مارپیچی مورد بررسی کامل قرار داده‌اند. ضمن این‌که، علی [10] روابط کاملی به‌منظور پیش‌بینی افت فشار درون لوله‌های مارپیچی بر حسب عدد اویلر، عدد رینولدز و گروه‌های هندسی ارائه کرده است. هارت و همکاران [11] یک نمودار برای تخمین ضریب اصطکاک در لوله‌های مارپیچی مشابه نمودار مودی برای لوله‌های معمولی ارائه کرده‌اند. اخیراً پاوار و ساناپوار [12] بررسی تجربی جامعی در مورد جریان‌های نیوتنی و غیر نیوتنی سیالات درون لوله‌های مارپیچی با هندسه‌های مختلف انجام داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش قطر کویل، ضریب انتقال حرارت کلی و اعداد ناسلت کاهش می‌یابد.

از طرف دیگر، نانوسیال‌سازی یکی دیگر از تکنیک‌های غیر فعال افزایش انتقال حرارت می‌باشد که توجه بسیاری از محققان را در دو دهه‌ی اخیر به خود جلب کرده است. نانوسیال شامل یک مخلوط پراکنده‌ی جامد-مایع پایدار از ذرات نانو (کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر) در یک سیال پایه مرسوم هم‌چون آب، اتیلن گلایکول، روغن و غیره می‌باشد. با معلق کردن ذرات نانو، عملکرد حرارتی سیال به‌طور محسوسی بدون این‌که در سیستم افت فشار قابل‌ملاحظه‌ای ایجاد شود، افزایش می‌یابد. دلایل اصلی این بهبود عبارتند از [13]: ۱- با توجه به نقش سطوح نانوذرات در انتقال حرارت، سطح جانبی نسبی بسیار بزرگ نانوذرات باعث افزایش شدید انتقال حرارت توسط این ذرات داخل سیال می‌شود.

۲- نانو ذرات معلق‌شده، هدایت حرارتی مؤثر سیال را افزایش می‌دهند.

۳- برهم‌کنش و برخورد بین ذرات نانو، سیال و سطح جامد بیش‌تر می‌شود.

٤- نوسان و تلاطم سیال با حضور ذرات نانو تشدید می‌شود.

۵- پراکندگی ذرات نانو باعث پخش‌شدن گرادیان دما در تمام سیال می‌شود. در نتیجه ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی کاهش و طول توسعه یافتگی افزایش می‌یابد.

افت فشار و انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال تیتان/آب درون تبادلگر حرارتی دو لوله‌ای تحت شرایط مرزی شار ثابت توسط دانگتونگسوک و وانگ‌ویز [14] مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج آن‌ها حاکی از افزایش ٦ تا ۱۱ درصدی ضریب انتقال حرارتی نانوسیال در مقایسه با سیال پایه بدون افزایش قابل توجه افت فشار می‌باشد. زینالی‌هریس و همکاران [15] انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال آلومینا/آب و اکسیدمس/آب را در یک لوله‌ی مدور معمولی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأکید کردند که ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه و عدد پکلت افزایش می‌یابد. عباسیان و امانی [16, 17] تأثیر قابل‌توجه غلظت و سایز نانو ذرات تیتان بر انتقال حرارت اجباری و افت فشار نانوسیال درون تبادل‌گر حرارتی دولوله‌ای جریان متقابل مورد تأکید قرار داده‌اند. اکبرنیا و همکاران [18] به‌صورت عددی انتقال حرارت جابه‌جایی نانو سیالات آلومینا/آب در یک لوله‌ی خمیده‌ی افقی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کرده‌اند که غلظت نانو ذرات تأثیر مستقیمی بر ضریب اصطکاک ندارد. جمشیدی و همکاران [19] تأثیر زیاد قطر کویل و طول گام را بر عملکرد حرارتی نانوسیالات درون لوله‌های مارپیچی در بررسی عددی خود مورد تأکید قرار داده‌اند. بهابادی و همکاران [20] از نانولوله‌های کربنی چندجداره درون روغن پایه‌ی نانوسیال‌هایی با غلظت‌های مختلف ساختند و تأثیر

استفاده از آن‌ها را درون لوله‌های مارپیچی مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج آن‌ها نانوسیال در مقایسه با سیال پایه عدد ناسلت بالاتری از خود نشان می‌دهد. آن‌ها هم‌چنین افزایش تا هفت برابری نرخ انتقال حرارت نانوسیالات در لوله‌های مارپیچی در مقایسه با سیال پایه در لوله‌های معمولی را گزارش نموده‌اند. هاشمی و همکاران [21] با آزمایش اثر نانوسیال اکسید مس/روغن پایه، تأکید کردند که استفاده از لوله‌های مارپیچی در مقایسه با استفاده از نانوسیال‌ها روش مؤثرتری می‌باشد. کومار و همکاران [22] افزایش ۵۵ درصدی عدد ناسلت و ۲۶ درصدی افت فشار نانوسیال اکسیدآلومینیوم/آب درون لوله‌های مارپیچی در جریان آشفته نسبت به آب خالص را گزارش نموده‌اند. البته آن‌ها تأثیر پارامترهای هندسی لوله‌ی مارپیچی از جمله نسبت انحنا و طول گام را در کار خود مورد بررسی قرار نداده‌اند.

کاهانی و همکاران [23] تأثیر استفاده از نانوسیال آلومینا/آب و لوله‌های مارپیچی را در بهبود نرخ انتقال حرارت مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج تجربی آن‌ها حاکی از افزایش ۳۲۰ درصدی عدد ناسلت در صورت استفاده‌ی هم‌زمان از دو تکنیک مورد اشاره نسبت به جریان آب خالص در لوله‌ی مستقیم می‌باشد. هم‌چنین آن‌ها در پژوهشی دیگر مقایسه‌ای تجربی بین جریان آرام نانوسیال‌های اکسید آلومینیوم (۳۵ نانومتر)/آب و اکسید تیتانیوم (۵۰ نانومتر)/آب درون لوله‌های مارپیچی انجام داده‌اند [24]. نتایج حاکی از افزایش بیش‌تر نرخ انتقال حرارت نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب به‌علت ضریب هدایت حرارتی بیش‌تر و سایز کوچک‌تر نانوذرات نسبت به نانوسیال اکسیدتیتانیوم/آب می‌باشد. اخیراً اکبری‌دوست و همکاران [25] بررسی تجربی و عددی بر رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی جریان آرام و پایدار نانوسیال اکسیدمس/آب درون لوله‌های مارپیچی با شرط مرزی دما ثابت انجام داده‌اند. نتایج ارائه‌شده توسط آن‌ها مؤید افزایش نرخ انتقال حرارت و افت فشار جریان نانوسیال با افزایش غلظت حجمی نانوسیال و عدد رینولدز می‌باشد. هم‌چنین آن‌ها بیان کرده‌اند که میزان انتقال حرارت و افت فشار با افزایش نسبت انحنا در لوله‌های مارپیچی افزایش می‌یابد. ضمن این‌که آن‌ها در آزمایش‌های خود بازه‌ی محدودی از عدد رینولدز (صفر تا ۱۰۰۰) را مورد بررسی قرار داده‌اند، حال آن‌که در لوله‌های مارپیچی جریان تا رینولدز حدود ٤٠٠٠ (البته بسته به طول گام لوله‌ی مارپیچی) هم‌چنان آرام است. هم‌چنین آن‌ها با معرفی پارامتری به نام شاخص عملکرد (Performance index) بیان نمودند که استفاده از تکنیک مارپیچ کردن لوله به‌جای استفاده از نانوسیال، روش به‌مراتب به‌تری به‌منظور بهبود عملکرد حرارتی تجهیزات می‌باشد.

اگرچه بررسی‌های مختلفی در مورد دو تکنیک نانوسیال‌سازی و لوله‌های مارپیچی به‌صورت مجزا صورت پذیرفته است اما صرفاً تعداد محدودی پژوهش پیرامون ترکیب دو روش مذکور در بهبود انتقال حرارت تجهیزات حرارتی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش تأثیر پارامترهای هندسی لوله‌های مارپیچی (نسبت انحنا و طول گام) بر عملکرد حرارتی و میزان افت فشار جریان نانوسیال تیتان/آب در بازه‌ی وسیعی از اعداد رینولدز مورد بررسی قرار می‌گیرد و روابطی به‌منظور تخمین عدد ناسلت و افت فشار جریان نانوسیال داخل لوله‌های مارپیچی ارائه می‌گردد. هم‌چنین بعد از این بررسی‌ها، نتایج تجربی مربوط به جریان آب خالص و نانوسیال درون لوله‌های مارپیچی و لوله‌ی مستقیم مقایسه می‌گردد.

آماده‌سازی نانوسیال تیتان/آب

نانوذرات تیتان (TiO_2) که خواص فیزیکی و تصاویر میکروسکوب الکترونی عبوری (TEM) آن‌ها به‌ترتیب در جدول (۱) و شکل (۲) آورده شده است در این پژوهش به‌منظور تولید نانوسیال مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل کروی نانوذرات در تصاویر به‌وضوح

قابل تشخیص می‌باشد. نانوذرات تیتان در آب‌خالص در غلظت‌های مختلف حجمی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵و ۲ درصدی و به روش دو مرحله‌ای تولید می‌گردد. برای تهیه‌ی نانوسیال باید از پراکندگی صحیح نانوذرات در سیال و مکانیزم صحیح افزودن ذرات به سیال برای رسیدن به مخلوط پراکنده‌ی جامد-مایع پایدار بدون ته‌نشینی آگاه بود. زمانی که پودرهای مورد نظر به آب اضافه می‌شوند تشکیل یک حالت غیرهمگن ناپایدار می‌دهند و مخلوط جامد-مایع با تجمع نانوذرات مشاهده می‌شود و ته‌نشینی بعد از چند دقیقه آغاز می‌گردد. به‌منظور بهبود پایداری نانوسیالات از دو روش امواج مافوق صوت (Ultrasonic) و ماده‌ی سطحی‌ساز (Surfactant) استفاده می‌شود. ابتدا مقادیر مشخص از نانوذرات و ستیل تری متیل آمونیوم برماید (CTAB) به‌عنوان ماده‌ی فعال‌ساز سطحی با نسبت بهینه‌ی وزنی حدود یک به بیست به‌مدت ۱۰ ساعت توسط دستگاه هم‌زن مغناطیسی با دور کم هم زده می‌شود. سپس مخلوط حاصل به‌مدت ۴۵ دقیقه در دستگاه فراصوت (مدل UP400SHielscher) تحت امواج مافوق صوت قرار داده می‌شود. نانوسیال تولیدی با شرایط فوق، ماندگاری تا بیش از ۴۵ روز را به خوبی از خود نشان می‌دادند. کسر حجمی و جرم حجمی نانوذرات داخل مخلوط پراکنده‌ی جامد-مایع به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

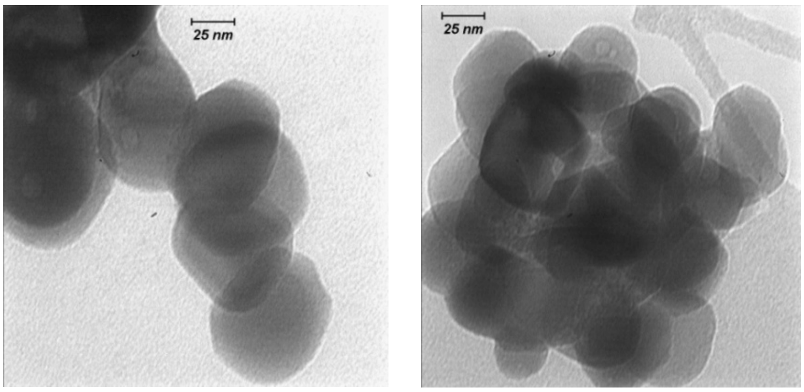
$$\varphi = \frac{\vartheta_p}{\vartheta_t} \quad (۱)$$

$$\rho_p = \frac{m_p}{\vartheta_p} \quad (۲)$$

در نتیجه مقدار مناسب نانوذرات برای تهیه‌ی ۲ لیتر نانوسیال (بر حسب گرم) به‌وسیله‌ی رابطه‌ی زیر با توجه به کسر حجمی نانوذرات محاسبه می‌شود:

$$m_p = 7800\,\varphi \quad (۳)$$

قابل ذکر است که جرم حجمی واقعی نانوذرات بیش از پنجاه برابر جرم حجمی ظاهری آن‌ها است. بنابراین جرم مناسب از روی جرم حجمی واقعی آن‌ها تعیین می‌شود.



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نانوذرات تیتان مورد استفاده در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی

جدول ۱ خواص فیزیکی نانوذرات مورد استفاده در این پژوهش

هدایت حرارتی (W/m.K)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)	جرم حجمی واقعی (Kg/m^3)	قطر متوسط (nm)	خلوص	نانو ذره
۱۳/۷	۷۱۰	۳۹۰۰	۵۰	٪۹۹	TiO_2

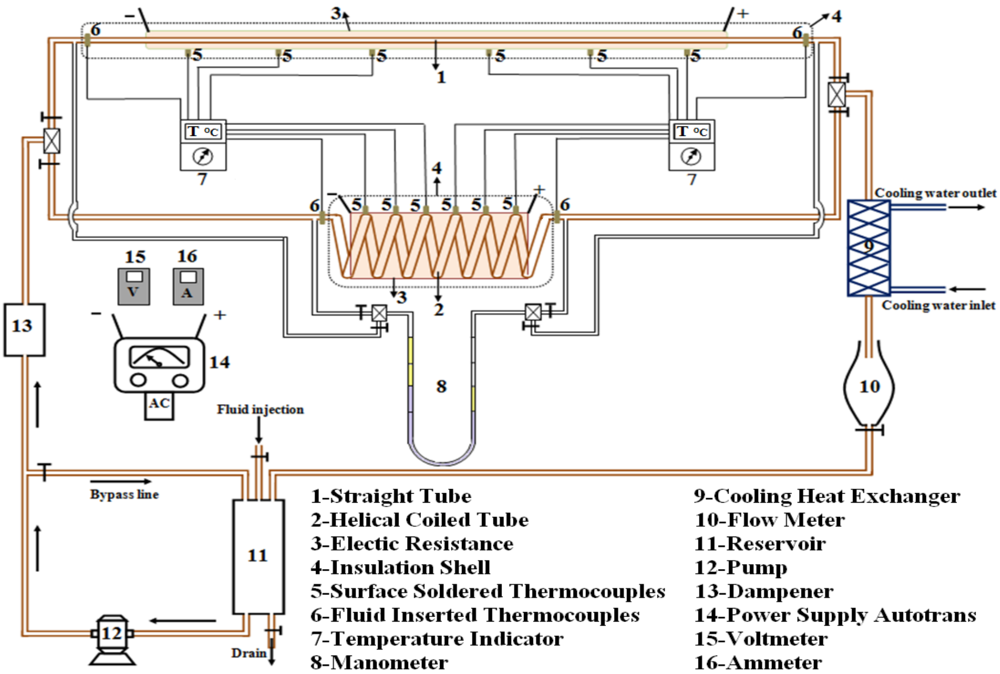
شرح دستگاه و روش انجام آزمایش‌ها

یک سیستم آزمایشی که تصویر و شماتیک آن در شکل (۳) نشان داده شده است به‌منظور بررسی و مطالعه‌ی فرآیند انتقال حرارت جابه‌جایی آرام و هم‌چنین میزان افت فشار جریان نانوسیال داخل لوله‌ی مارپیچی تحت شار ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد. دستگاه به‌صورت یک سیستم بسته است که شامل مخزن ذخیره‌ی سیال عامل (۲ لیتر)، پمپ، جریان برگشتی به مخزن به‌منظور کنترل و اعمال دبی مورد نظر، مخزن تثبیت‌کننده به‌منظور کاهش نوسانات ناشی از پمپ به‌روی سیال، بخش‌های مربوط به تست انتقال حرارت، تبادلگر حرارتی به‌منظور خنک‌سازی سیال عامل و ثابت نگه داشتن دمای ورودی آن به بخش انتقال حرارت، مانومتر U شکل به‌منظور تعیین افت فشار سیال جاری در لوله‌ها و یک مخزن مدرج به‌منظور اندازه‌گیری دبی می‌باشد.

قسمت اصلی سیستم شامل سه لوله‌ی مارپیچی با هندسه‌ی متفاوت و یک لوله‌ی مستقیم تحت شار ثابت می‌باشد که مشخصات هندسی آن‌ها در جدول (۲) آورده شده است. لوله‌ی مسی جنس ایده‌آل برای بسیاری از کاربردهای صنعتی است. استحکام و تاحدودی انعطاف‌پذیری آن باعث ساخت و شکل دادن راحت لوله می‌گردد. هم‌چنین ضریب هدایت حرارتی بالای آن باعث استفاده‌ی روزافزون از آن در صنعت به‌خصوص برای تجهیزات تبرید و تهویه‌ی هوا شده است. در ضمن لوله‌ی ساخته‌شده از مس یکی از معدود مواد طبیعی است که به‌صورت ۱۰۰ ٪ قابل بازیافت است. از این رو برای جلوگیری از له‌شدگی آن‌ها به هنگام ساخت، ابتدا درون لوله‌ی مسی با شن نرم پر می‌شود و سپس لوله به دور یک مدول تفلونی فشرده که قبلاً طول گام و قطر کویل لوله‌ی مورد نظر بر روی آن تراشکاری شده است پیچیده می‌شود. شرایط شار ثابت در سطح لوله به‌وسیله‌ی المنت‌های الکتریکی حلقوی تأمین می‌گردد. به‌این منظور از یک منبع الکتریکی (Autotrans) که مستقیماً به برق شهری متصل می‌باشد استفاده می‌شود. توسط ولت‌متر و آمپر موجود در مدار توان ورودی به المنت‌های حرارتی اندازه‌گیری می‌گردد. تصویر لوله‌های مارپیچی ساخته شده همراه با المنت‌های الکتریکی مورد استفاده در شکل (٤) آورده شده است. دو ترموکوپل (PT100 – 0.1°C) داخل جریان سیال به‌منظور اندازه‌گیری دمای بالک سیال ورودی به هر لوله و خروجی از آن تعبیه می‌گردد. به‌منظور اندازه‌گیری دمای سطح لوله نیز از ترموکوپل‌های مشابه نوع قبلی استفاده می‌شود. موقعیت قرارگیری ترموکوپل‌ها به‌روی سطح خارجی لوله‌های مارپیچی در هر پیچ همان‌طور می‌باشد که در شکل (۱) نشان داده شده است. برای لوله‌ی مستقیم موقعیت ترموکوپل‌ها به‌ترتیب به‌فاصله‌ی ۱۰، ۳۳، ۷۸، ۱۰۰ و ۱۲۳ سانتی‌متری از طرف ورودی سیال به لوله می‌باشد. ضمن این‌که طول ورودی و خروجی معادل به‌ترتیب ۳۰ و ۱۵ برابر قطر لوله‌ی اصلی به‌منظور حفظ توسعه‌یافتگی هیدرودینامیکی جریان در سیستم مدنظر قرار گرفته است. هم‌چنین تمام تجهیزات الکتریکی (از قبیل ترموکوپل‌ها، آمپرمتر و ولت‌متر) و تجهیزات مکانیکی بادقت کالیبره گردیده‌اند. برای اندازه‌گیری افت فشار در ناحیه‌ی آزمایش از یک مانومتر U شکل حاوی جیوه و تتراکلرید کربن استفاده می‌شود که افت فشار را در طول لوله‌های مارپیچی برای شدت جریان‌های مختلف سیال اندازه‌گیری می‌کند. به‌منظور کاهش اتلاف حرارتی به محیط، لوله‌ها با دو لایه‌ی ضخیم از فایبرگلاس و پشم سنگ ایزوله می‌گردند.

جریان سیال از داخل مخزن پمپ می‌شود و

به‌منظور تنظیم دبی جریان مقداری از سیال از طریق یک خط جریان برگشتی به داخل مخزن برگشت داده می‌شود. سپس سیال وارد یک تثبیت‌کننده‌ی جریان (Dampener) می‌گردد و بعد از آن به‌سمت لوله‌های آزمایش فرستاده می‌شود. سیال خروجی با جریان آب سرد خنک می‌شود و سپس وارد ناحیه‌ی اندازه‌گیری دبی می‌گردد. به‌منظور تعیین دبی، جریان سیال قبل از ورود به مخزن از یک محفظه‌ی مدرج که در قسمت پایین آن شیری قرار دارد عبور می‌کند و با ثبت زمان لازم برای پر شدن حجم مشخصی از محفظه می‌توان دبی جریان را اندازه‌گیری کرد. طی آزمایش‌ها، دمای ورودی و خروجی سیال عامل، دمای سطوح خارجی لوله‌ها، دبی جریان، توان ورودی به بخش حرارتی و میزان افت فشار سیال درون لوله‌ها اندازه‌گیری و ثبت می‌شود.



شکل ۳ چیدمان کلی سیستم مورد استفاده در آزمایش‌ها

جدول ۲ مشخصات هندسی لوله‌های مورد استفاده در این پژوهش

Tube	d (mm)	t (mm)	L (mm)	D (mm)	λ	b (mm)	N
لوله‌ی مارپیچی -I (HCT-I)	۷	۰/۵	۱۳۱۸/۸	۱٤۰	۲۰	۲٤	۳
لوله‌ی مارپیچی -II (HCT-II)				۷۰	۱۰	٤۲	٦
لوله‌ی مارپیچی -III (HCT-III)				۷۰	۱۰	۲٤	٦
لوله‌ی مستقیم				-			



شکل ٤ لوله‌های مارپیچی و المنت‌های الکتریکی حلقوی مورد استفاده

آنالیز داده های تجربی و بررسی میزان خطای آزمایش‌ها

داده‌های تجربی به‌منظور تعیین عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت متوسط سیال داخل لوله‌ها به‌شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$\bar{h}(\exp) = \frac{V\ .\ I}{A(T_w - T_b)_M} \quad (٤)$$

$$\overline{Nu}(\exp) = \frac{\bar{h}_{nf}(\exp)\ d}{k_{nf}} \quad (٥)$$

در روابط فوق، $(T_w\text{-}T_b)_M$ اختلاف دمای متوسط لگاریتمی می‌باشد. افت فشار به‌طور مستقیم از روی مانومتر برای حالت‌های مختلف خوانده می‌شود.

نانوسیال یک سیستم چندجزئی است و مرفولوژی و جهت‌گیری ذرات پراکنده در آن پیچیده می‌باشد. از این رو، روابط بسیار محدودی برای انتقال حرارت نانوسیال پیشنهاد شده است. البته با توجه به ابعاد بسیار کوچک و کسر حجمی پایین ذرات مورد استفاده در تهیه‌ی نانوسیال‌ها این مخلوط‌های پراکنده‌ی جامد-مایع در عمل معمولاً شبیه سیال خالص عمل می‌کنند و بنابراین تحت این شرایط روابط متداول برای سیالات همگن را می‌توان برای سیستم نانوسیال نیز به کار برد.

خواص فیزیکی و حرارتی مورد استفاده برای نانوسیال شامل جرم حجمی، گرانروی، گرمای مخصوص و ضریب هدایت حرارتی با توجه به خواص آب، ذرات نانو و کسر حجمی مورد نیاز در دمای متوسط بالک تعیین می‌شوند:

جرم حجمی نانوسیال [26]:

$$\rho_{nf} = \varphi\rho_s + (1-\varphi)\rho_f \quad (٦)$$

گرانروی نانوسیال [27]:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{1 - 34.87\ (\frac{d_s}{d_f})^{-0.3}\ (\varphi)^{1.03}} \quad (٧)$$

که d_f قطر معادل یک مولکول سیال پایه می‌باشد و توسط رابطه‌ی زیر حساب می‌شود:

$$d_f = 0.1\ (\frac{6\ M}{N^*\ \pi\ \rho_{f_0}})^{1/3} \quad (٨)$$

ظرفیت حرارتی مؤثر نانوسیال [28]:

$$C_{Pnf} = \frac{\varphi.(\rho_p.Cp_P) + (1-\varphi).(\rho_f.Cp_f)}{\rho_{nf}} \quad (٩)$$

هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال [27]:

$$k_{nf} = k_f(1 + 4.4\ Re^{0.4} Pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10} \left(\frac{k_s}{k_f}\right)^{0.03} \varphi^{0.66}) \quad (١٠)$$

هم‌چنین سیدر و تیت [29] و مانلاپاز و چرچیل [30] معادلات (١٢ و ١١) را برای تخمین عدد ناسلت متوسط جریان سیال داخل لوله‌های مستقیم و مارپیچی ارائه کرده‌اند.

$$\overline{Nu_s} = 1.86\ (\ Re\ \ Pr\ \frac{d}{L})^{1/3}\ (\frac{\mu}{\mu_w})^{0.14} \quad (١١)$$

$$\overline{\mathrm{Nu_c}} = \left\{\left[\frac{48}{11} + \frac{\frac{51}{11}}{\left(1+\frac{1342}{\mathrm{Pr.He^{0.2}}}\right)^2}\right]^3 + 1.86\left[\frac{\mathrm{He}}{1+\frac{1.15}{\mathrm{Pr}}}\right]^{\frac{3}{2}}\right\}^{1/3} \quad (۱۲)$$

که Re و Pr به‌ترتیب عدد رینولدز و عدد پرانتل می‌باشند و طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$\mathrm{Re} = \rho\,\overline{\mathrm{U}}\,\mathrm{d}/\mu \quad (۱۳)$$

$$\mathrm{Pr} = \mu\, {}^{\mathrm{C_p}}\!/_{\mathrm{k}} \quad (۱٤)$$

انتقال جریان آرام به آشفته درون لوله‌های خمیده (به‌علت تأثیرات تثبیت‌کننده‌ی جریان ثانویه) در رینولدزهای بالاتری نسبت به لوله‌های مستقیم اتفاق می‌افتد [31]. در جدول (۳) روابط ارائه‌شده توسط برخی محققان پیرامون تخمین عدد رینولدز بحرانی درون لوله‌های خمیده ارائه شده است. هم‌چنین عدد رینولدز بحرانی برای لوله‌های مارپیچی مورد استفاده در این پژوهش در جدول مذکور آورده شده است. به‌منظور حفظ آرام بودن رژیم جریان کلیه‌ی آزمایش‌ها در رینولدزهای کم‌تر از ٤٥۰۰ انجام پذیرفت.

بررسی‌هایی به‌منظور تعیین میزان خطا در محاسبه‌ی عدد ناسلت به‌وسیله‌ی اندازه‌گیری‌های تجربی صورت پذیرفته است. این بررسی‌ها تأثیر خطاهای اندازه‌گیری را در نتیجه‌ی کلی نشان می‌دهد. معادله‌ی مورد استفاده برای تخمین خطا رابطه‌ی (۱٥) می‌باشد [37].

$$\mathrm{U_{Pi}} = \frac{\mathrm{X_i}}{\mathrm{P}}\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{X_i}}\mathrm{U_{Xi}} \quad (۱٥)$$

که در این رابطه Xi پارامتر قابل اندازه‌گیری، P کمیت محاسبه شده از روی پارامترهای قابل اندازه‌گیری، $\mathrm{U_{Xi}}$ خطای اندازه‌گیری (نسبت دقت سیستم اندازه‌گیری به کوچک‌ترین مقدار کمیت اندازه‌گیری‌شده در آزمایش‌ها) و $\mathrm{U_{pi}}$ حداکثر خطای ممکن در محاسبه‌ی یک کمیت می‌باشد. تأثیر تمام خطاها در محاسبه‌ی کمیت نهایی به‌صورت معادله‌ی (١٦) بیان می‌شود [38].

$$\mathrm{Max\ U_P} = \pm\left[\left(\frac{\mathrm{X_1}}{\mathrm{P}}\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{X_1}}\mathrm{U_1}\right)^2 + \left(\frac{\mathrm{X_2}}{\mathrm{P}}\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{X_2}}\mathrm{U_2}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\mathrm{X_3}}{\mathrm{P}}\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{X_3}}\mathrm{U_3}\right)^2\right]^{0.5} \quad (١٦)$$

که $\mathrm{U_P}$ نشان دهنده‌ی خطای حاصل در تخمین کمیت می‌باشد.

نحوه‌ی محاسبه‌ی خطای حاصل در محاسبه‌ی عدد ناسلت در یکی از آزمایش‌ها به‌عنوان نمونه در زیر آورده می‌شود:

خطای تقریبی اندازه‌گیری دبی جرمی سیال

$$\mathrm{U_{\dot m}} = \pm 3 \times 10^{-2}$$

خطای اندازه‌گیری ولتاژ

$$\mathrm{U_V} = \pm\frac{0.1}{74.3} = \pm 1.345 \times 10^{-3}$$

خطای اندازه‌گیری جریان (آمپر)

$$\mathrm{U_I} = \pm\frac{0.01}{1.37} = \pm 7.3 \times 10^{-3}$$

خطای اندازه‌گیری اختلاف دمای لگاریتمی سطح لوله و سیال

$$\mathrm{U_{(T_w-T_b)_M}} = \pm\frac{0.1}{13.5} = \pm 7.4 \times 10^{-3}$$

جدول ۳ مقایسه‌ی عدد رینولدز بحرانی در لوله‌های مارپیچی

ایتو [36]	کوبیر [35]	اشمیت [34]	کیونکولین [33]	سرینیواسان [32]	
۹٥۷۲	٦۰۹۲	۱۱۷٦۷	۱۰۱٦٥	١٦٢٧١	۱۰
٧٦٦٨	٤٨٨۰	۹۸۸۳	۷۳۳۹	١٤۰١٦	۲۰

برای محاسبه‌ی هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال از رابطه‌ی (۱۰) استفاده شده است که برای ذرات کروی با خطای ناچیز هدایت حرارتی نانوسیال را پیش‌بینی می‌کند.

خطای تقریبی رابطه تخمین هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال عبارت است از: $U_{k_{nf}} = \pm 3 \times 10^{-2}$

بنابراین حداکثر خطای اندازه‌گیری عدد ناسلت به‌صورت رابطه‌ی (۱۷) بیان می‌گردد:

$$\text{Max } U_{Nu} = \pm\Big[(U_V)^2 + (U_I)^2 + \left(-U_{(T_w - T_b)_M}\right)^2 + \left(-U_{k_{nf}}\right)^2\Big]^{0.5} \quad (۱۷)$$

با جای‌گذاری مقادیر خطا در رابطه‌ی (۱۷) میزان خطا در این آزمایش خاص ۳/۱۷٪ به‌دست می‌آید.

نتایج تجربی و بحث

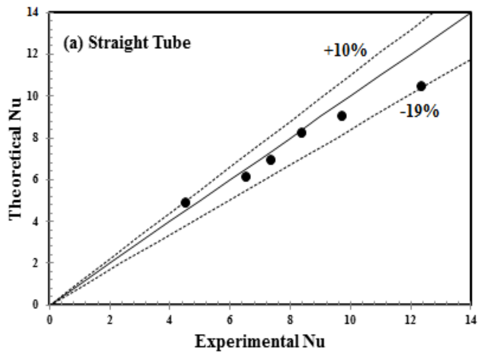
بررسی صحت و دقت نتایج تجربی. به‌منظور بررسی میزان دقت نتایج و اندازه‌گیری‌های تجربی، ابتدا برای تمام لوله‌ها آزمایش‌هایی با آب خالص انجام پذیرفت و نتایج حاصل با نتایج تئوری ارائه‌شده توسط محققان مقایسه گردید.

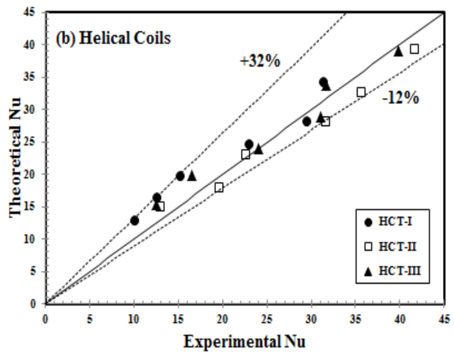
در شکل (۵) نتایج تجربی اندازه‌گیری عدد ناسلت در لوله‌های مستقیم و مارپیچی با مقادیر تئوری متناظر آن (معادلات ۱٤ و ۱۵) مقایسه شده است. میزان انحراف داده‌های تجربی از داده‌های حاصل از رابطه‌ی تئوری برای لوله‌ی مستقیم بین ۱۹٪- و ۱۰٪+ و برای لوله‌های خمیده بین ۱۲٪- و ۳۲٪+ می‌باشد. ذکر این نکته ضروری می‌باشد که روابط مختلفی توسط محققان برای پیش‌بینی انتقال حرارت داخل لوله‌ها ارائه شده است که گاه اختلاف‌های چشمگیری از هم دارند. بر این اساس تطبیق قابل قبولی بین داده‌های آزمایشگاهی و روابط تئوری برقرار می‌باشد که نشان از صحت و دقت مناسب روش‌های اندازه‌گیری این پژوهش می‌باشد.

اثر نسبت انحنای لوله‌های مارپیچی بر نرخ انتقال حرارت و افت فشار. در شکل (٦) به‌منظور بررسی اثر نسبت انحنا نتایج مربوط به عدد ناسلت جریان آب خالص و نانوسیال در غلظت‌های مختلف حجمی درون لوله‌های مارپیچی I و III بر حسب عدد رینولدز مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. تمام مشخصات هندسی این دو لوله به جز نسبت انحنا، همان‌طور که در جدول (۲) به آن اشاره شد، یکسان می‌باشند.

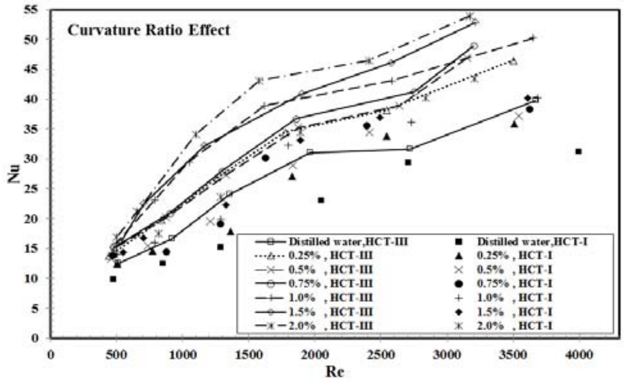
همان‌طور که از شکل (٦) به وضوح قابل مشاهده است، اولاً نانوسیال در تمامی غلظت‌ها نرخ انتقال حرارت بیش‌تری نسبت به آب خالص از خود نشان می‌دهند و هر چه غلظت نانوسیال بیش‌تر شود میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال در عدد رینولدز حدود ۱۳۱۰ و برای جریان داخل لوله مارپیچی I با افزایش غلظت حجمی نانوسیال از ۰/۲۵٪ تا ۲٪ عدد ناسلت از ۱۷/۹۰ تا ۲۳/٦۵ افزایش می‌یابد؛ یعنی ۳۲/۱ درصد بهبود در نرخ انتقال حرارت مشاهده می‌شود. دلیل اصلی این بهبود ناشی از افزایش قابل توجه هدایت حرارتی نانوسیالات نسبت به سیال پایه می‌باشد. ثانیاً نرخ انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز روند صعودی از خود نشان می‌دهد؛ به‌عنوان نمونه، با افزایش عدد رینولدز از ۵۰۳ تا ۳۱۷۰ برای نانوسیال ۲٪ حجمی درون لوله‌ی مارپیچی III عدد ناسلت از ۱٦/۹ تا ۵۳/۹ افزایش می‌یابد که دلیل اصلی این پدیده تشدید فرآیند تبادل انرژی در سیال به‌دلیل حرکات براونی و اتفاقی نانوذرات می‌باشد. در جریان‌هایی با دبی‌های بالا اثرات پراکندگی و حرکات نامنظم و توزیع نانوذرات در سیال تشدید می‌شود که‌این امر می‌تواند باعث برهم‌زدن لایه‌ی مرزی حرارتی تشکیل‌یافته و نازک کردن آن شود که منجر به

گرادیان دمایی بالاتر در مجاورت دیواره و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت گردد. ثالثاً خطوط نشان‌دهنده‌ی عدد ناسلت سیال جاری در لوله‌ی مارپیچی III ‏(۱۰=λ) در سطح بالاتری نسبت به لوله‌ی مارپیچی I ‏(۲۰=λ) برای غلظت‌های یکسان از نانوسیال قرار دارند که‌این نشان‌دهنده عملکرد حرارتی به‌تر و مناسب‌تر نانوسیال در لوله با نسبت انحنای کوچک‌تر می‌باشد. به‌عنوان مثال، برای نانوسیال ٪۱ حجمی جاری در لوله‌ی مارپیچی III با افزایش عدد رینولدز از ٤۹۹ تا ۳٦٥۰ عدد ناسلت از ۱٥/۹ تا ٥۰/۲ بهبود پیدا می‌کند در حالی که عدد ناسلت این نانوسیال در لوله‌ی مارپیچی I با تغییر عدد رینولدز بین ٥۰٥ و ۳٦۸٤ از ۱٤/۰ تا ٤۰/۲ افزایش می‌یابد. نسبت انحنای کوچک‌تر منجر به تشدید نیروی گریز از مرکز و در نتیجه تقویت جریان ثانویه در لوله‌های مارپیچی می‌گردد. با تقویت جریان ثانویه و اختلاط سطح مقطعی بیش‌تر ذرات، حرکت براونی نانوذرات افزایش می‌یابد که به نوبه‌ی خود سبب افزایش بیش‌تر عدد ناسلت می‌گردد. به همین دلیل، لوله‌ی مارپیچی III که نسبت انحنای کوچک‌تری دارد نرخ انتقال بالاتری را نسبت به لوله‌ی مارپیچی I بروز می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده توسط دیگر محققان [25,30] نیز حاکی از اثر مثبت افزایش نسبت انحنای لوله‌ی مارپیچی بر نرخ انتقال حرارت می‌باشد.

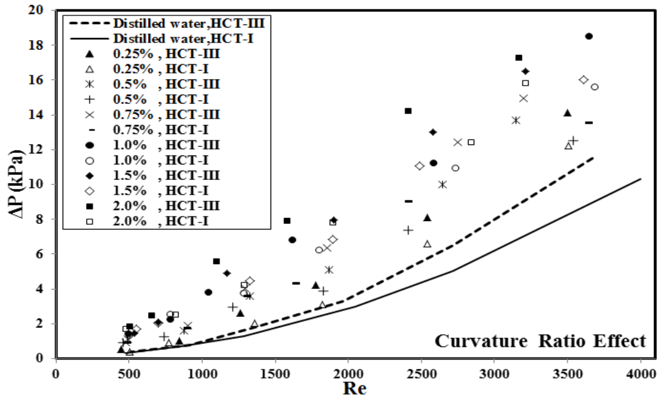




شکل ٥ مقایسه بین عدد ناسلت متوسط تئوری و تجربی برای آب خالص درون (a) لوله‌ی مستقیم (b) لوله‌های مارپیچی



شکل ٦ عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای جریان آب خالص و نانوسیال با غلظت‌های مختلف درون لوله‌های مارپیچی I و III به‌منظور بررسی اثر نسبت انحنای لوله‌های مارپیچی



شکل ۷ افت فشار جریان آب خالص و نانوسیال با غلظت‌های مختلف حجمی درون لوله‌های مارپیچی I و III به‌منظور بررسی اثر نسبت انحنای لوله‌های مارپیچی

در شکل (۷) میزان افت فشار محوری جریان آب خالص و نانوسیال داخل لوله‌های مارپیچی I و III نشان داده شده است.

شکل (۷) نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانوسیال و هم‌چنین عدد رینولدز میزان افت فشار داخل لوله افزایش می‌یابد. به‌طور مثال در بالاترین عدد رینولدز در هر آزمایش با افزایش غلظت نانوسیال از ۰/۲۵٪ تا ۲٪ میزان افت فشار درون لوله‌ی مارپیچی I از ۱۲/۲۳ تا ۱۵/۸۲ افزایش می‌یابد. دلیل این رفتار، افزایش جرم حجمی و گرانروی سیال به خاطر حضور نانوذرات می‌باشد [39]. علاوه بر آن پراکندگی و حرکات تصادفی نانوذرات به‌خصوص در نزدیک دیواره‌ی لوله منجر به تشدید نرخ تبادل ممنتوم بین نانوذرات می‌گردد. این تبادل ممنتوم نیز خود منجر به افزایش میزان افت فشار محوری جریان داخل لوله می‌شود.

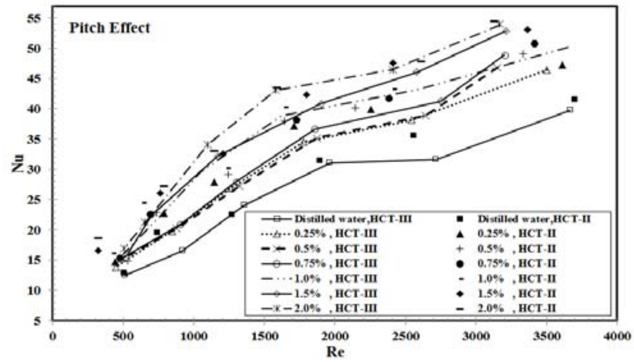
ضمن این‌که جریان نانوسیال داخل لوله‌ی مارپیچی III که نسبت انحنای کوچک‌تری دارد افت فشار بیش‌تری را نشان می‌دهد؛ به‌عنوان نمونه، میزان افت فشار محوری برای جریان نانوسیال ۱/۵٪ حجمی درون لوله‌ی مارپیچی I با تغییر عدد رینولدز بین ۵۵۰ تا ۳۶۱۰ از ۱/۶۶ تا ۱۵/۹۹ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد، در حالی که‌این میزان افزایش برای جریان داخل لوله‌ی مارپیچی III از ۱/۴۵ تا ۱۶/۵کیلوپاسکال در محدوده‌ی رینولدز ۵۳۵ تا ۳۲۱۵ می‌باشد. نسبت انحنای کوچک‌تر لوله‌ی مارپیچی III منجر به تقویت جریان ثانویه به‌علت نیروهای گریز از مرکز غیرتعادلی قوی‌تر در جریان و هم‌چنین افزایش اختلاط ذرات در هر سطح مقطع لوله نسبت به لوله‌ی مارپیچی I می‌گردد که تمامی این عوامل سبب تشدید حرکت براونی نانو ذرات و تبادل ممنتوم بین آن‌ها می‌گردد و در نتیجه میزان افت فشار بیش‌تری در لوله‌ی مارپیچی III مشاهده می‌شود.

اثر طول گام لوله‌های مارپیچی بر نرخ انتقال حرارت و افت فشار. به‌منظور بررسی اثر طول گام، نتایج مربوط به جریان داخل لوله‌های مارپیچی II و III که تمام مشخصات هندسی به‌جز طول گام آن‌ها یکسان می‌باشد مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. بدین منظور عدد ناسلت و میزان افت فشار جریان آب خالص و نانوسیال در غلظت‌های مختلف حجمی بر حسب عدد رینولدز به ترتیب در شکل‌های (۹ و ۸) نشان داده شده است.

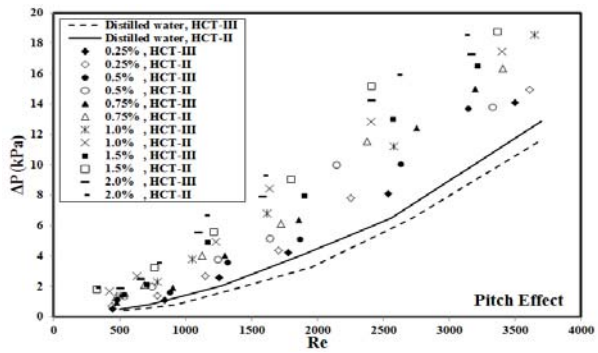
همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده لوله‌ی مارپیچی II (b=۴۲) در غلظت‌های یکسان از نانوسیال عدد ناسلت بالاتری نسبت به لوله‌ی مارپیچی III (b=۲٤) دارد. به‌عنوان مثال برای غلظت ۱/۵٪ حجمی نانوسیال، عدد ناسلت برای لوله‌ی مارپیچی III بین ۱٦/۲ و ۵۲/۹ تغییر می‌کند در حالی که برای لوله‌ی مارپیچی II عدد ناسلت در سطوح بالاتر و بین ۱٦/۵ و

۵۳/۱ تغییر می‌کند. البته میزان افزایش عدد ناسلت در لوله‌ی مارپیچی II در مقایسه با لوله‌ی مارپیچی III در اعداد رینولدز پایین بیش‌تر قابل ملاحظه است. به‌طور مثال در عدد رینولدز ٤٤٠ برای جریان ٪۰/۲۵ حجمی از نانوسیال درون لوله‌ی مارپیچی II عدد ناسلت ١٤/٨ و برای لوله‌ی مارپیچی III، ١٣/٨ می‌باشد یعنی ٧/٢٥ درصد افزایش در نرخ انتقال حرارت. اما در عدد رینولدز حدود ۳۵۵۰ افزایش عدد ناسلت از ٤٦/٥ تا ٤٧/٣ یعنی ١/٧٢ درصد می‌باشد. این نوع تغییر عدد ناسلت احتمالاً ناشی از تأثیر بیش‌تر نیروی شناوری می‌باشد که ساختار جریان را فقط در رینولدزهای پایین (که نیروهای گریز از مرکز ضعیف‌تر است) تغییر می‌دهد. هم‌چنین تغییر طول گام لوله‌ی مارپیچی منجر به تغییر نیروهای گریز از مرکز سیال جاری در لوله‌ی مارپیچی می‌گردد که‌این به نوبه‌ی خود جریان‌های ثانویه را در هر سطح مقطع لوله تحت تأثیر قرار می‌دهد. ماکزیمم عدد ناسلت حاصل از جریان نانوسیال ٪۲ حجمی درون لوله‌ی مارپیچی II و رینولدز ۳۱۲۵ و برابر ٥٤/٥ می‌باشد که حدود ٤٢/١ درصد بهبود نسبت به جریان آب خالص در رینولدز مشابه نشان می‌دهد.

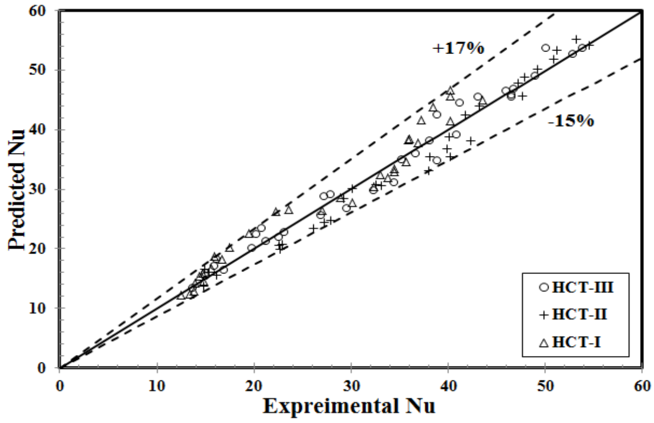
این نتایج تا حد زیادی یافته‌های تئوری توسط مانلاپاز و چرچیل [30,40] را پوشش می‌دهد. آن‌ها تأثیر ناچیز طول گام را بر نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری به استثنای اعداد رینولدز پایین و نسبت انحنای بزرگ لوله‌ی مارپیچی مورد تأکید قرار داده‌اند. هم‌چنین در نتایج به‌دست آمده توسط اکبری‌دوست و همکاران [25] نیز به‌علت طول گام کوچک لوله‌های مورد بررسی، تأثیر طول گام به‌وضوح قابل بررسی نیست.



شکل ۸ عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای جریان آب خالص و نانوسیال با غلظت‌های مختلف درون لوله‌های مارپیچی II و III به‌منظور بررسی اثر طول گام لوله‌های مارپیچی



شکل ۹ افت فشار جریان آب خالص و نانوسیال با غلظت‌های مختلف حجمی درون لوله‌های مارپیچی II و III به‌منظور بررسی تأثیر طول گام لوله‌های مارپیچی



شکل ۱۰ مقایسه بین اعداد ناسلت متوسط تخمین زده شده با رابطه‌ی (۱۸) و اعداد ناسلت تجربی برای جریان نانو سیال داخل لوله‌های مارپیچی

هم‌چنین همان‌طور که در شکل (۹) به‌وضوح نشان داده شده است نانوسیال جاری در لوله‌ی مارپیچی II افت فشار بیش‌تری را نسبت به لوله‌ی مارپیچی III تجربه می‌کند که دلیل آن طول گام بزرگ‌تر لوله‌ی مارپیچی و در نتیجه افزایش اختلاط ذرات نانو می‌باشد.

تخمین عدد ناسلت و افت فشار جریان نانوسیال داخل لوله‌های مارپیچی. با انجام آنالیز رگرسیون بر روی داده‌های تجربی حاصل از این پژوهش، عدد ناسلت جریان نانوسیال درون لوله‌های مارپیچی با معادله‌ی (۱۸) تخمین زده می‌شود.

$$\overline{Nu_C} = 0.865\ He^{0.531}\ Pr^{0.431}\ \varphi^{0.113} \qquad (۱۸)$$

ضریب تخمین رابطه‌ی فوق R^2=۹۶/۷٪ می‌باشد که برای جریان نانوسیال تیتان/آب با غلظت‌های حجمی کم‌تر از ۲٪ مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است انحراف بین عدد ناسلت تخمین زده شده و عدد ناسلت تجربی در بازه‌ی بین ۱۵٪- و ۱۷٪+ قرار می‌گیرد.

هم‌چنین با روش مشابه، رابطه‌ی (۱۹) برای تخمین میزان افت فشار جریان نانوسیال درون لوله‌های مارپیچی با ضریب تخمین ۹۵/۹٪=R^2 به‌دست می‌آید.

$$\Delta P_C = 16.61\ \ He^{1.27}\ \varphi^{0.41} \qquad (۱۹)$$

ضمن این‌که محدوده‌ی قابل قبول پارامترهای موجود در روابط (۱۹ و ۱۸) به قرار زیر است:

$$101 \le He \le 1152\ , \qquad 4.8 \le Pr \le 8.95\ ,\quad 0.0025 \le \varphi \le 0.02$$

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر نسبت انحنا و طول گام لوله‌های مارپیچی بر میزان افت فشار و عدد ناسلت جریان آرام نانوسیال تیتان/آب در غلظت‌های ۰/۲۵٪ تا ۲٪ حجمی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها بر روی سه لوله‌ی مارپیچی با مشخصات هندسی متفاوت صورت پذیرفت و نتایج به‌دست آمده از این مطالعه به‌طور خلاصه به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

۱- استفاده از نانوسیال منجر به بهبود نرخ انتقال حرارت در تمامی شرایط عملیاتی مورد مطالعه می‌گردد. در محدوده‌ی غلظتی مورد آزمایش، هر چه غلظت نانوسیال مورد استفاده بیش‌تر باشد عدد ناسلت

بیش‌تر افزایش می‌یابد.
۲- افزایش عدد رینولدز باعث افزایش عدد ناسلت و افت فشار جریان می‌شود. این افزایش که بیش‌تر ناشی از افزایش سرعت جریان در لوله می‌باشد باعث تقویت جریان ثانویه و در نتیجه بهبود عملکرد آن بر افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود.
۳- پارامترهای هندسی لوله‌ها تأثیر قابل توجهی بر انتقال حرارت و میزان افت فشار جریان نانوسیال می‌گذارد. کاهش نسبت انحنا و یا افزایش طول گام در لوله‌های مارپیچی به‌علت تقویت نیروی گریز از مرکز و تشدید جریان ثانویه و هم‌چنین بهبود اختلاط سطح مقطعی نانوذرات منجر به ازدیاد تبادل ممنتوم و انرژی بین ذرات می‌گردد و در نتیجه عدد ناسلت و افت فشار جریان افزایش می‌یابد. هرچند تأثیر نسبت انحنا از اثر طول گام بیش‌تر می‌باشد.
٤- حداکثر عدد ناسلت برای جریان نانوسیال ۲٪ حجمی درون لوله‌ی مارپیچی II (که دارای بزرگ‌ترین طول گام و کوچک‌ترین نسبت انحنا می‌باشد) برابر با ٥٤/٥ می‌باشد که در رینولدز ۳۱۲۵ اتفاق می‌افتد.

فهرست نمادها

A	سطح داخلی لوله (m^2)
b	طول گام لوله‌ی مارپیچی (m)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)
d	قطر داخلی لوله (m)
D	قطر کویل (m)
De	عدد دین (بدون بعد)
E	میزان خطا
f	ضریب اصطکاک فنینگ
$\bar{h}$	ضریب انتقال حرارت متوسط ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$)
He	عدد هلیکال (بدون بعد)
I	شدت جریان الکتریکی (A)
k	هدایت حرارتی ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)
L	طول لوله (m)
$\dot{m}$	دبی جرمی ($kg\ s^{-1}$)
M	وزن مولکولی سیال پایه
N	تعداد دور لوله‌ی مارپیچی
N^*	عدد آووگادرو
$\overline{Nu}$	عدد ناسلت متوسط (بدون بعد)
Pr	عدد پرانتل (بدون بعد)
R^2	ضریب تخمین (٪)
Re	عدد رینولدز (بدون بعد)
T	دمای (K)
t	ضخامت لوله (m)
$\bar{U}$	سرعت متوسط ($m\ s^{-1}$)
V	ولتاژ (V)

حروف یونانی

Δ	افت فشار محوری (Pa)
ρ	جرم حجمی($kg\ m^{-3}$)
μ	گرانروی(Pa s)
λ	نسبت انحنای لوله‌ی مارپیچی (D/d)
φ	جزء حجمی نانو ذرات
ϑ	حجم (m^3)

اندیس‌ها

b	بالک
c	لوله‌ی مارپیچی
f	سیال پایه
f_0	سیال پایه در دمای ۲۰ °C
fr	نقطه‌ی ذوب
nf	نانوسیال
p	ذره
s	لوله‌ی مستقیم
t	کل
w	دیوار

مراجع

1. Naphon, P. and Wongwises, S.,"A review of flow and heat transfer characteristics in curved tubes", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 10, pp. 463-490, (2006).
2. Mishra, P. and Gupta, S.N., "Momentum transfer in curved pipes 1.Newtonian fluids; 2.Non-Newtonian Fluids", *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 18, pp. 130-142, (1979).
3. Seban, R.A. and McLaughlin, E.F., "Heat transfer in tube coils with laminar and turbulent flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 6, pp. 387-395, (2006).
4. Hawthrone, W.R., "Secondary circulation in fluid flow", *Processing the Royal of Society London A*, Vol. 206, pp. 374-387, (1951).
5. Austin, L.R. and Searder, J.D., "Entry region for steady viscous flow in coiled circular pipes", *AIChE Journal*, Vol. 20, pp. 820-822, (1974).
6. Moulin, P., Manno, P., Rouch, J.C., Serra, C., Clifton, M.J. and Aptel, P., "Flux improvement by Dean vortices: Ultrafiltration of colloidal suspensions and macromolecular suspensions", *Journal of Membrane Science*, Vol. 156, pp. 109, (1999).
7. Chen, H. and Zhang, B., "Fluid flow and mixed convection heat transfer in a rotating curved pipe", *International Journal of Thermal Science*, Vol. 42, pp. 1047–1059, (2003).
8. Grindley, J.H. and Gibson, A.H., "On the frictional resistance of air through a pipe", *Processing the Royal of Society London A*, Vol. 80, pp. 114-139, (1908).
9. Patankar, S.V., Pratap, V.S. and Spalding, D.B., "Prediction of laminar flow and heat transfer in helically coiled pipes", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 62, pp. 539-551, (1974).
10. Ali, S.; "Pressure drop correlations for flow through regular helical coil tubes", *Fluid Dynamics Research*, Vol. 28, pp. 295-310, (2001).
11. Hart, J., Ellenberger, J. and Hamersma, P.J., "Single and two-phase flow through helically coiled tubes", *Chemical Engineering Science*, Vol. 45, pp. 775-783, (1988).
12. Pawar, S.S. and Sunnapwar, V.K., "Experimental studies on heat transfer to Newtonian and non-Newtonian fluids in helical coils with laminar and turbulent flow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 792-804, (2013).
13. Zussman, S., "More about Argonne's stable, highly conductive nanofluids, Technology Transfer at Argonne, Public communication", *Argonne National Laboratory*, IL, USA, (2002).
14. Duangthongsuk, W. and Wongwises, S., "An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO_2–water nanofluids flowing under a turbulent flow regime", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 334-344, (2010).
15. ZeinaliHeris, S., Etemad, S.Gh. and Nasr Esfahany, M. , "Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer", *International Communication of Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 529-535, (2006).

16. Abbasian Arani, A.A. and Amani, J., "Experimental study on the effect of TiO_2–water nanofluid on heat transfer and pressure drop", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 42, pp. 107-115, (2012).
17. AbbasianArani, A.A. and Amani, J.,"Experimental investigation of diameter effect on heat transfer performance and pressure drop of TiO_2–water nanofluid", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 520-533, (2013).
18. Akbarinia, A. and Behzadmehr, A., "Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in horizontal curved tubes", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 1327-1337, (2007).
19. Jamshidi, N., Farhadi, M., Sedighi, K. and Domeiry Ganji, D., "Optimization of design parameters for nanofluids flowing inside helical coils", *International Communication of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 311-317, (2012).
20. Akhavan-Behabadi, M.A., FakoorPakdaman, M. and Ghazvini, M., "Experimental investigation on the convective heat transfer of nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes under uniform wall temperature condition", *International Communication of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 556-564, (2012).
21. Hashemi, S.M. and Akhavan-Behabadi, M.A., "An empirical study on heat transfer and pressure drop characteristics of CuO–base oil nanofluid flow in a horizontal helically coiled tube under constant heat flux", *International Communication of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 144-151, (2012).
22. Mukesh Kumar, P.C., Kumar, J. and Suresh, S., "Heat transfer and friction factor studies in helically coiled tube using Al_2O_3 /water Nanofluid", *European Journal of Scientific Research*, Vol. 82, pp. 161-172, (2012).
23. Kahani, M., ZeinaliHeris, S. and Mousavi, S.M., "Effects of curvature ratio and coil pitch spacing on heat transfer performance of Al_2O_3/water nanofluid laminar flow through helical coils", *Journal of Dispersion Science And technology*, (2013) doi:10.1080/01932691.2013.764485.
24. Kahani, M., ZeinaliHeris, S. and Mousavi, S.M., "Comparative study between metal oxide nanopowders on thermal characteristics of nanofluid flow through helical coils", *Powder Technology*, Vol. 246, pp. 82-92, (2013).
25. Akbaridoust, F., Rakhsha, M., Abbassi, A. and Saffar-Avval, M., "Experimental and numerical investigation of nanofluid heat transfer in helically coiled tubes at constant wall temperature using dispersion model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 58, pp. 480-491, (2013).
26. Drew, D.A. and Passman, S.L., "*Theory of Multi Component Fluids*", First ed., Springer, Germany, (1999).
27. Corcione, M., "Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids", *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 789-793, (2011).
28. Einstein, A., "*Investigation on Theory of Brownian motion*", First ed., Dover Publication, USA, (1956).
29. Seider, E.N. and Tate, G.E., "Heat transfer and pressure drop of liquid in tubes", *Industrial &*

Engineering Chemistry Research, Vol. 28, pp. 1429-1435, (1936).

30. Manlapaz, R.L. and Churchill, S.W., "Fully developed laminar convection from a helical coil", *Chemical Engineering Communications*, Vol. 97, pp. 185-200, (1981).
31. Ko, T.H. and Ting, K., "Optimal Reynolds number for the fully developed laminar forced convection in a helical coiled tube", *Energy*, Vol. 31, pp. 2142–2152, (2006).
32. Srinivasan, P.S., purkar, S.S. and Holland, F.A., "Pressure drop and heat transfer in coils", *The Chemical Engineer*, Vol. 218, pp. 113-119, (1968).
33. Cioncolini, A. and Santini, L., "An experimental investigation regarding the laminar to turbulent flow transition in helically coiled pipes", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, pp. 367-380, (2006).
34. Schmidt, D.F., "Warmeubargang and Druckverlust in Rohrshlangen", *Chemical Engineering and Technology*, Vol. 13, pp. 781, (1967).
35. Kubair, V. and Varrier, C.B.S, "Pressure drop for liquid flow in helical coils", *Transactions of the Indian Institute of Chemical Engineers*, Vol. 14, pp. 93-97, (1961).
36. Ito, H., "Friction factors for turbulent flow in curved pipes", *Journal of Basic Engineering ASME Transactions ASME*, Vol. 81, pp. 123, (1959).
37. Young, H.D., "*Statistical treatment of experimental data*", McGraw-Hill, New York, (1962).
38. Holman, J.D., "*Experimental methods for engineers*", Fifth ed., McGraw-Hill, NewYork, (1986).
39. Drew, D.A. and Passman, S.L., "*Theory of Multi Component Fluids*", First ed., Springer, Germany, (1999).
40. Manlapaz, R.L. and Churchill, S.W., "Fully developed laminar flow in a helically coiled tube of finite pitch", *Chemical Engineering Communications*, Vol. 7, pp. 57-78, (1980).